

за ограничений по условиям работы теплообменного оборудования, что соответственно уменьшает их КПД. Таким образом, ГТУ замкнутого цикла способны заменить классические ГТ, но они имеют свою область применения, например, в атомной энергетике. Большая часть современных ГТУ работает с открытым контуром.

### Список использованных источников

1. Потребности электроэнергетики России в газовых турбинах: текущее состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2017. №11. С. 53-63.
2. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля / под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 564 с.
3. Reuters Echogen Power Systems waste heat recovery system available as turn-key solution, 2014. [Электронный ресурс]: офиц. сайт – Режим доступа: <http://www.echogen.com/waste-heat-to-power>.

УДК 662.613

**Д. Н. Степанов, А. Ф. Рыжков**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДЕМЕРКУРИЗАЦИИ СИНТЕЗ-ГАЗА

### Аннотация

*Ртуть является наиболее опасным представителем среди токсичных металлов. Превышение дозы облучения ртутью свыше 0,1 мкг/кг массы тела/день может привести к возникновению неврологических эффектов от воздействия ртути во время развития плода и раннего детства. Однако, ртуть не только оказывает негативное влияние на окружающую среду, но и вызывает коррозию проточной части газовой турбины на электростанциях следующего поколения таких как парогазовые установки с внутрицикловой газификацией (ПГУ–ВЦГ или IGCC). С термодинамической точки зрения наиболее эффективной является демеркуризация при высокой температуре синтез-газа. Однако, на данный момент нет проверенных технологий удаления ртути при высокой температуре.*

**Ключевые слова:** ртуть, демеркуризация, активированный уголь, пропитанный биоуголь.

### Abstract

*Mercury is the most dangerous representative among toxic metals. Exceeding the dose of mercury exposure above 0.1 µg/kg body weight/day can lead to neurological effects from exposure to mercury during fetal development and early childhood. However, mercury not only has a negative impact on the environment, but also causes corrosion of the flowing part of the gas turbine at next-generation power plants such as combined cycle gasification plants (IGCC). From the thermodynamic point of view, demercurization at high temperature of the syn-gas is the most effective. However, at the moment there are no proven mercury removal technologies at high temperature.*

**Key words:** mercury, demercurization, activated carbon, impregnated biochar.

### *Введение*

Ртуть является наиболее опасным представителем среди токсичных металлов из-за ее летучести, стойкости и биоаккумуляции в окружающей среде в виде метилртути ее неврологического воздействия на здоровье человека. В настоящее время угольные котлы являются крупнейшим источником ртути в Соединенных Штатах, выпуская примерно 50 тонн ртути в год или около одной трети от общей антропогенной эмиссии [1]. В Канаде из антропогенных источников ежегодно выделяется 8 тонн ртути, причем, на угольные электростанции приходится 34 % от общего объема выбросов [2].

Ртуть в углях обычно встречается в сочетании с пиритом ( $\text{FeS}_2$ ) и ртутной рудой ( $\text{HgS}$ ), а также ртуть может образовывать соединения с органическими составляющими угля. При высоких температурах сжигания соединения ртути, содержащиеся в углях, практически полностью разлагаются, с образованием атомарной ртути, и переходят в газообразное состояние (температура фазового перехода жидкость/газ для ртути составляет  $356,66^\circ\text{C}$ ) и, в конечном счете, выбрасываются в атмосферу с уходящими газами или концентрируется на негорючих частицах.

Цель работы – оценочное определение объема выбросов ртути в теплоэнергетике и выбор наиболее перспективного метода демеркуризации синтез-газа при высокой температуре.

Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать данные открытых источников по объемам добычи угля;
- 2) провести анализ существующих и разрабатываемых методов улавливания ртути.

#### *Оценочные объемы выбросов ртути*

Для таких стран, как Россия и Китай отсутствуют точные данные по ежегодным выбросам ртути, однако возможно провести приблизительную оценку. Согласно статистическим данным British Petroleum (ныне – BP) в 2013 году был добыт следующий объем угля, а именно: в Российской Федерации – 347,1 млн. т, в США – 892,6 млн. т, в Канаде – 69,5 млн. т, в Китае – 3680 млн. т., что в процентном соотношении составляет 4,3 %, 12,9 %, 0,9 % и 47,4 % соответственно [3]. Принимая во внимание эти данные, можно предположить, что в России выбрасывается около 30 т. ртути/год, а в Китае – 550 т. ртути/год.

#### *Анализ методов улавливания ртути*

Диапазон технологий значительно варьируется и включает в себя решения на основе активированных углей, летучей золы, цеолитов, серы, аммиака, катализаторов, коронного разряда, регенерируемых сорбентов и локально-генерируемых сорбентов [5]. Основываясь на текущем состоянии разработки, впрыскивание сорбента, сухая сероочистка и очистка угля имеют наибольший потенциал для улавливания Hg. Технология ввода сорбента может быть внедрена на большинстве станций и предлагает широкий подход к демеркуризации. На данный момент наиболее перспективным сорбентом представляется активированный уголь.

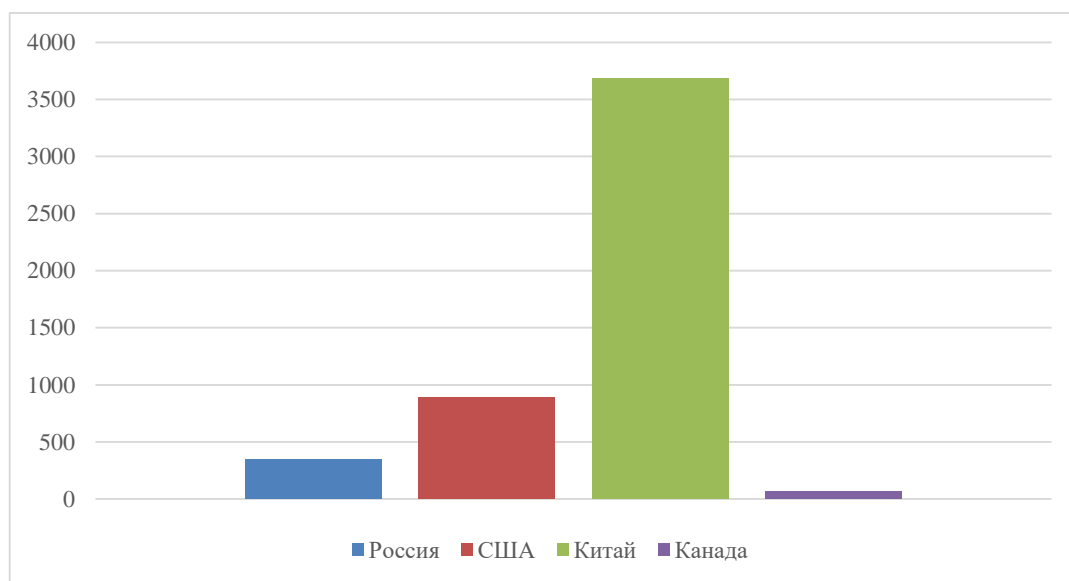


Рис. 1. Объемы добычи угля за 2013 год, млн. т

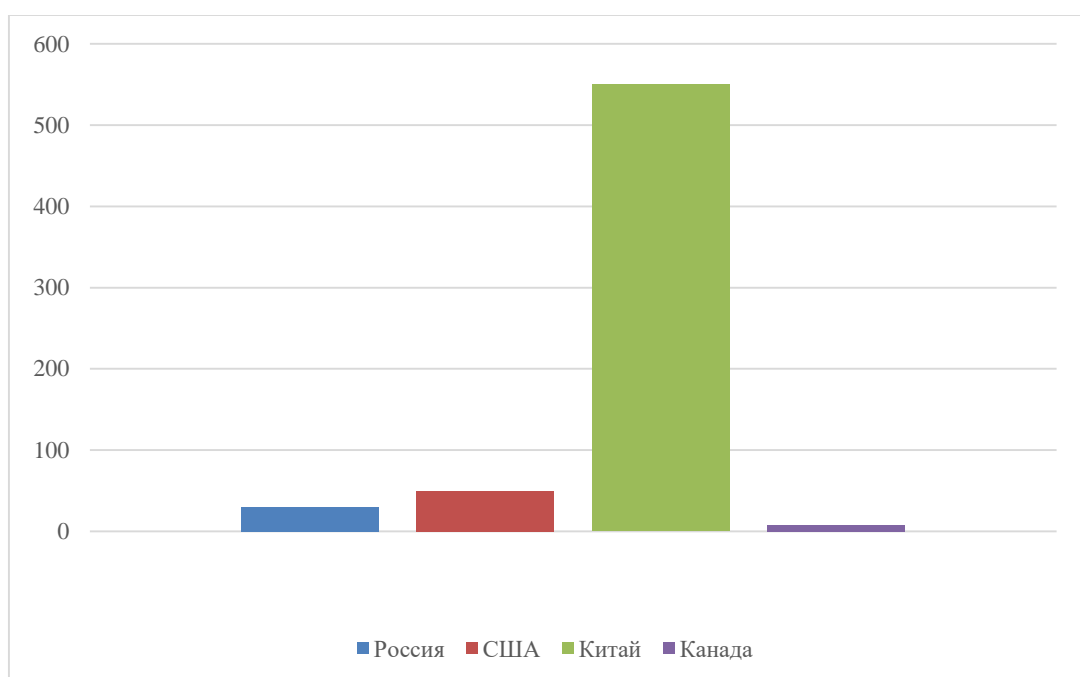


Рис. 2. Оценочные объемы выбросов ртути, т/год

Активированный уголь может производиться из ископаемого угля (весь коммерческий активированный уголь) и из биомассы (биоуголь). За последние годы проводилось множество исследований эффективности обоих типов активированного угля. Си-Хиун Ли и Юнг-Ок Парк пришли к выводам, что присадка серы может как увеличивать эффективность поглощения ртути (в случае активированного угля с большим диаметром пор), так и уменьшать (угли с малым диаметром пор); а также при повышении температуры газа до 70 °С эффективность улавливания ртути увеличивалась, дальнейшее повышение температуры до 140 °С приводило к значительному снижению эффективности (рисунок 3) [6].

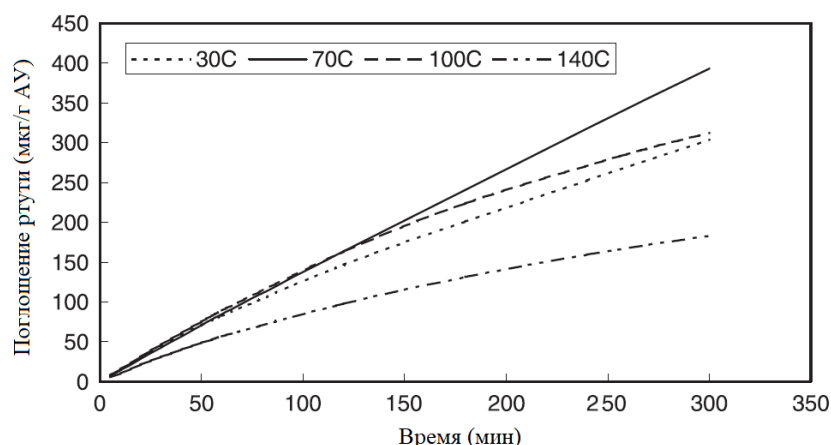


Рис. 3. Эффективность поглощения ртути активированным углем, пропитанным серой, в зависимости от температуры

М. Де и другие провели сравнение различных пропитывающих веществ на основе галогенидов. В ходе исследования было установлено, что пропитанный иодидом калия, активированный биоуголь показал 100 % эффективность удаления ртути на всем протяжении исследования адсорбции [4]. Возможные реакции, с помощью которых образуются иодиды на поверхности, приведены ниже (уравнения (1.1)–(1.5)).

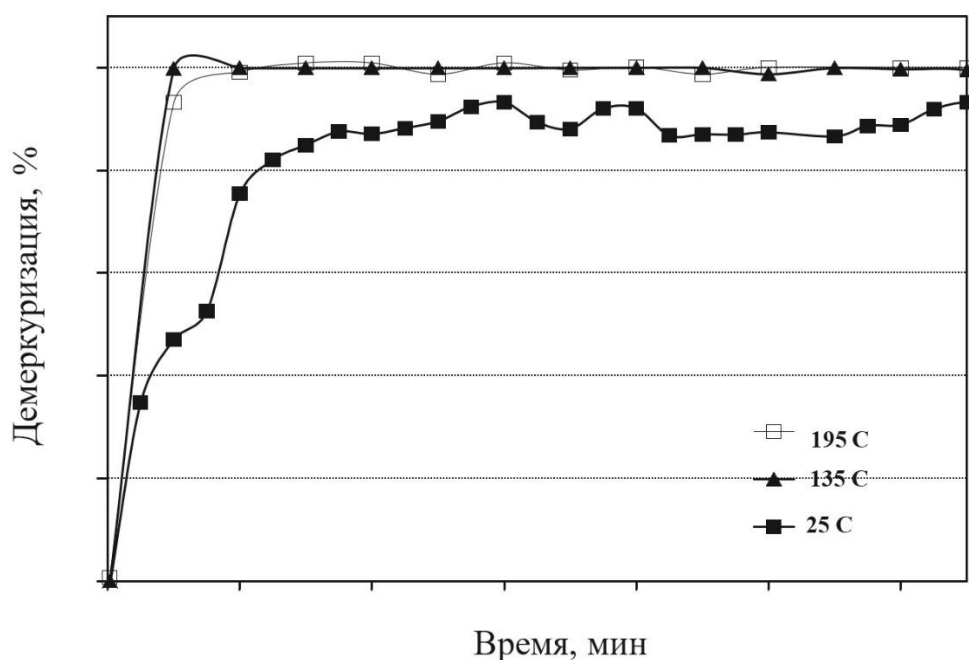
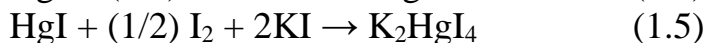
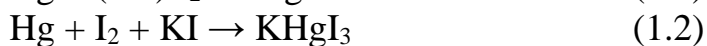


Рис. 4. Влияние температуры на эффективность удаления ртути активированным углем 0,1KI-АУ

### *Заключение*

Исходя из объемов выбросов ртути можно сделать вывод, что сокращение выбросов ртути является важной задачей.

Пропитанный иодидом калия активированный уголь показал 100 % эффективность удаления ртути даже при 195 °С, что делает его перспективным сорбентом для демеркуризации синтез-газа на ПГУ–ВЦГ при более высокой температуре.

### **Список использованных источников**

1. Status review of mercury control options for coal-fired power plants / J.H. Pavlish, E. A. Sondreal, M. D. Mann, E. S. Olson, K. C. Galbreath, D. L. Laudal, S. A. Benson // Fuel Processing Technology. 82 (2003). Pp. 89-165.
2. Shewchuk Mercury removal by bio-char based modified activated carbons / M. De, R. Azargohar, A. K. Dalai, S. R. Shewchuk // Fuel. 103 (2013). Pp. 570-578.
3. BP, Statistical Review of world energy, 2014.
4. National Research Council, Toxicological Effects of Methyl Mercury, National Academy Press, Washington, DC, 2000, August, Library of Congress Card Number 00-108382.
5. Chang R. The development of cost effective mercury control sorption processes, Proceedings of Air Quality II: Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter Conference // McLean, VA, Sept. 19 – 21, 2000, Paper A4-2.
6. Gas-phase mercury removal by carbon-based sorbents / Si-Hyun Lee, Young-Ok Park // Fuel Processing Technology. 84 (2003). Pp. 197-206.

УДК 669.187

**С. Н. Тимошенко<sup>1</sup>, Ю. Г. Ярошенко<sup>2</sup>, М. В. Губинский<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина;

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

<sup>3</sup> Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ЛИТЕЙНОГО КЛАССА**

### **Аннотация**

*Моделирование теплообмена в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи (ДСП) литейного класса вместимостью 3т показало, что при длительности простоя печи 18–20 часов и более, замена 40 % футеровки стен и 16–20 % футеровки свода водоохлаждаемыми элементами с объемной структурой обеспечивает паритет с кирпичной*